

УДК 543.422.8

ВКЛАД ФОТО- И ОЖЕ-ЭЛЕКТРОНОВ В ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ УГЛЕРОДА ПРИ ПЕРВИЧНОМ ИЗЛУЧЕНИИ ТОНКООКОННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

А.Ю.Духанин, Г.В.Павлинский*, А.Ю.Портной*, А.В.Кюн**.

Иркутский государственный медицинский университет

664003, Иркутск, Красного Восстания, 1

*Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского госуниверситета

664003, Иркутск, бул.Гагарина 20

**Шелеховский кремниевый завод

666020, Шелехов Иркутской обл., ЗАО «Кремний»

pavlinsky@chem.isu.ru.

Поступила в редакцию 30 сентября 2002 г.

Интенсивности рентгеновского излучения углерода и ее составляющих сопоставлены для первичного излучения рентгеновских трубок с толщиной окна 300 мкм (заземленный анод) и 75 мкм (заземленный катод). Показано, что при существенном увеличении суммарной интенсивности рентгеновского излучения углерода вклад фото- и Оже-электронов в ее формирование меняется не столь значительно и по-прежнему необходим его учет при вычислительном моделировании процесса возбуждения. Экспериментальные результаты, полученные на спектрометре ARL-9800, подтвердили правильность расчетов интенсивности излучения углерода, выполненных с учетом ионизации его атомов фото- и Оже-электронами.

Духанин Алексей Юрьевич - старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики Иркутского государственного медицинского университета.

Область научных интересов: взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.

Автор 10 опубликованных работ.

Павлинский Гелий Вениаминович - доктор физико-математических наук, заведующий отделом НИИ прикладной физики Иркутского госуниверситета.

Область научных интересов: взаимодействие излучений с веществом, рентгено-

спектральный анализ.

Автор 160 опубликованных работ.

Портной Александр Юрьевич - аспирант Иркутского госуниверситета.

Область научных интересов: взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.

Автор 10 опубликованных работ.

Кюн Александр Валерьевич - инженер ЦЗЛ ЗАО «Кремний».

Область научных интересов: рентгенофлуоресцентный анализ.

Автор 5 опубликованных работ.

Введение

Распространенные алгоритмы [1-4] определения элементного состава материалов по интенсивностям линий рентгеновского спектра флуоресценции не могут быть использованы при определении содержаний элементов с малыми атомными номерами (углерод и др.). Причиной этого является недостаточная изученность процессов формирования рентгенофлуоресцентного аналитического сигнала таких элементов. Наи-

более эффективное при фотоионизации атомов этих элементов длинноволновое первичное излучение почти полностью поглощается Ве-окном рентгеновской трубки. Поэтому существенным фактором становится ионизирующее действие фото- и Оже-электронов, возникающих в анализируемом образце [5, 6]. Этот фактор не учитывается алгоритмами расчета интенсивности в более коротковолновой области рентгеновского спектра из-за его малой величины.

Использование в последние годы рентгеновских трубок с заземленным катодом и тонким бериллиевым окном позволило усилить длинноволновую составляющую первичного излучения и тем самым существенно увеличить интенсивность рентгеновской флуоресценции элементов с малыми атомными номерами, в том числе углерода. При этом ожидалось, что усиление длинноволновой составляющей первичного излучения ослабит роль фото- и Оже-электронов в формировании аналитического сигнала и сделает возможным применение для расчета его интенсивности математического аппарата, привлекаемого в современных способах рентгенофлуоресцентного определения содержаний элементов с более высокими атомными номерами.

Целью настоящей работы явилось сопоставление вклада фото- и Оже-электронов в формирование интенсивности углерода при толщине Векна рентгеновской трубки 300 мкм и 75 мкм, а также экспериментальное подтверждение результатов расчета интенсивности углерода для первичного излучения трубок с тонким окном.

Теория

Интенсивность рентгеновской флуоресценции N_i (выраженная числом квантов, приходящихся в единицу времени на единицу площади, нормальной к направлению распространения пучка) для некоторого элемента i в массивном образце при неоднородном первичном излучении может быть представлена [7] в виде

$$N_i = \frac{s}{4\pi R^2} \int_{\lambda_0}^{\lambda_q} \frac{N(\lambda) \theta_i(\lambda) d\lambda}{\frac{\mu(\lambda)}{\sin \varphi} + \frac{\mu(\lambda_i)}{\sin \psi}} \quad (1)$$

где $N(\lambda)$ – спектральная интенсивность первичного излучения, выраженная в квантах; $\theta_i(\lambda)$ – вероятность преобразования первичного рентгеновского кванта с длиной волны λ в квант флуоресцентного излучения с длиной волны λ_i ; $\mu(\lambda)$ и $\mu(\lambda_i)$ – массовые коэффициенты ослабления облучаемым образцом первичного и флуоресцентного излучения соответственно; φ и ψ – углы падения

на образец первичного и выхода из него флуоресцентного излучения соответственно; s – площадь образца; R – расстояние от образца до детектора.

При заземленном катоде рентгеновской трубки спектральная интенсивность первичного излучения является суммой двух компонентов:

$$N(\lambda) = N_1(\lambda) + N_2(\lambda), \quad (2)$$

где $N_1(\lambda)$ и $N_2(\lambda)$ – спектральное распределение первичного излучения, возникшего под действием электронов катодного пучка и под действием рассеянных электронов, возвращенных на анод электрическим полем. Оба компонента содержат тормозную и характеристическую составляющие. Спектральное распределение $N_1(\lambda)$, которое можно рассматривать как возникшее при столкновении потока электронов с незаряженной мишенью, изучено достаточно хорошо. Нами при расчетах использовано его теоретическое описание, предложенное в работе [8]. Спектральное распределение $N_2(\lambda)$ определено в работах [9, 10]. Оно получено с учетом энергетического спектра обратно рассеянных электронов [11] и учитывает две их последовательные «редиффузии».

Вероятность $\theta(\lambda)$ преобразования первичного кванта в квант излучения элементов с малыми атомными номерами учитывает возможность фотоионизации, эффекта избирательного возбуждения, а также ионизацию атомов фото- и Оже-электронами, возникающими в облучаемом материале:

$$\theta(\lambda) = \theta_{i1}(\lambda) + \theta_{i2}(\lambda) + \theta_{ij}(\lambda) + \theta_{io}(\lambda). \quad (3)$$

Для фотоионизации:

$$\theta_{i1}(\lambda) = \tau_{qi}(\lambda) \omega_{qi} p_{qk} c_i, \quad (4)$$

где $\tau_{qi}(\lambda)$ – частичный коэффициент фотоэлектрического поглощения первичного излучения для элемента i ; ω_{qi} – выход рентгеновской флуоресценции для q – уровня этого элемента; p_{qk} – вероятность испускания k -й линии серии q этого элемента; c_i – его содержание в образце.

Для эффекта избирательного возбуждения:

$$\theta_{i2}(\lambda) = 1/2 \sum_{j,k} \left\{ \theta_{j1}(\lambda) \theta_{i1}(\lambda_j) \left[\frac{\sin \varphi}{\mu(\lambda)} \ln \left(1 + \frac{\mu(\lambda)}{\mu(\lambda_j) \sin \varphi} \right) + \frac{\sin \psi}{\mu(\lambda_i)} \ln \left(1 + \frac{\mu(\lambda_i)}{\mu(\lambda_j) \sin \psi} \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

Суммирование в (5) ведется по всем линиям k всех элементов j , излучение которых способно возбудить атомы элемента i .

Для фотоэлектронов:

$$\theta_{if}(\lambda) = \omega_{qi} p_{qk} \sum_{j,m} [\tau_{mj}(\lambda) c_j n_{mj}(c_i, E)] \quad (6)$$

где $n_{mj}(c_i, E)$ – вероятность ионизации атомов элемента i фотоэлектроном m оболочки элемента j . Суммирование в (6) ведется по всем m оболочкам всех j элементов, фотоэлектроны которых способны ионизировать q оболочку атомов i .

Для Оже-электронов:

$$\theta_{iO} = \omega_{qi} p_{qk} \sum_j c_j \tau_{Kj}(\lambda) (1 - \omega_{Kj}) [0,7 n_{Kj}(c_i, E_{KL_2L_3}) + 0,3 n_{Kj}(c_i, E_{KL_2M_3})] \quad (7)$$

Суммирование в (7) ведется по всем элементам j , энергия Оже-электронов которых достаточна для ионизации q оболочки элемента i . Формула (7) учитывает влияние Оже-электронов K оболочки элементов j .

Рассмотренные теоретические зависимости использованы для выполнения расчетов интенсивности рентгеновского излучения углерода.

Результаты расчетов и их обсуждение

Результаты расчетов интенсивности рентгеновского излучения углерода, возбужденного излучением рентгеновской трубки с Ве-окном толщиной 75 мкм и с заземленным катодом, сопоставлены в табл. 1 с ранее полученными нами данными [5, 6] для трубок с толщиной окна 300 мкм и заземленным анодом.

Анод рентгеновской трубки Rh, напряжение на трубке 40 кВ. Расчеты выполнены для бинарных образцов, в которых основа (Si или Fe) составляет 99,9 вес. %.

Наблюдаемая в табл. 1 более высокая интенсивность для матрицы из железа объясняется тем, что L-оболочка Fe не участвует в поглощении K-излучения рассмотренного элемента. Из табл. 1 следует, что уменьшение толщины Ве-окна от 300 мкм до 75 мкм и заземление катода трубки увеличивает интенсивность рентгеновской флуоресценции углерода в 2,7 – 3,5 раза.

Таблица 1

Влияние толщины окна и изменения полярности рентгеновской трубки на интенсивность рентгеновской флуоресценции углерода в кремниевой и железной матрицах

Образец		Интенсивность (усл. ед.)		$I_{d=75 \text{ мкм}}$
		$I_{d=300 \text{ мкм}}$	$I_{d=75 \text{ мкм}}$	$I_{d=300 \text{ мкм}}$
99,9 % Si	0,1 % C	17	60	3,5
99,9 % Fe	0,1 % C	52	142	2,7

Для моноэлементного образца фотонное возбуждение атомов дополняется их ионизацией только собственными фотоэлектронами. Вклад фотоэлектронов в формирование интенсивности излучения моноэлементного образца углерода представлен в табл. 2. Здесь же учтено изменение интенсивности излучения при изменении полярности подключения и уменьшении толщины окна рентгеновской трубки. Материал анода и напряжение на трубке те же, что и для данных табл. 1.

Из табл. 2 следует, что максимальное увеличение интенсивности рентгеновского излучения для моноэлементного образца углерода, обусловленное использованием рентгеновских трубок с Ве-окном 75 мкм (Rh-анод, напряжение 40 кВ), составляет 4,3 раза по сравнению с трубками, имеющими заземленный анод и толщину окна 300 мкм. Вклад фотоэлектронов в возбуждение рентгеновского излучения сравнительно невелик и уменьшается с указанной заменой рентгеновской трубки в 1,4 раза.

Таблица 2

Влияние толщины бериллиевого окна и полярности подключения рентгеновской трубки на величину вклада фотоэлектронов и на интенсивность рентгеновской флуоресценции для моноэлементного образца

Образец	Вклад фотоэлектронов (%)		$I_{d=75 \text{ мкм}}$
	$d=300 \text{ мкм}$	$d=75 \text{ мкм}$	$I_{d=300 \text{ мкм}}$
C	12,3	17,7	4,3

Этот вклад многократно возрастает и обычно дополняется влиянием электронов Оже при малом содержании рассматриваемого элемента в некоторой матрице. При этом существенную роль играет элементный состав матрицы. В табл. 3 сопоставлены компоненты суммарной интенсивности рентгеновского излучения углерода в кремниевой и железной матрицах (содержание углерода 0,1%) для рентгеновских трубок с толщиной окна 75 мкм и 300 мкм (Rh-анод, напряжение 40 кВ).

Из табл. 3 следует, что переход к рентгеновским трубкам с тонким Ве-окном больше всего увеличивает интенсивность рентгеновской флуоресценции углерода (рост в 4,5 раза), тогда как интенсивность, возбужденная фото- и Оже-электронами, возрастает в 2,4 раза (железная матрица) – 3,3 раза (кремниевая матрица). Соответственно растет вклад флуоресценции в суммарную интенсивность излучения. Однако из-за одновременного роста интенсивности излучения, возбужденного фото- и Оже-электронами, вклад последних при тонком окне рентгеновской трубки по-прежнему остается определяющим.

Влияние толщины Ве-окна рентгеновской трубки на величину вклада флуоресценции в формирование интенсивности рентгеновского излучения углерода представлено на рис. 1. Рассмотрен случай малого содержания углерода (0,1 %) в железной матрице.

Из рис. 1 следует, что вклад интенсивности флуоресценции является определяющим только при толщине окна, не превышающей 5-7 мкм. При толщине большей чем 50 мкм величина вклада

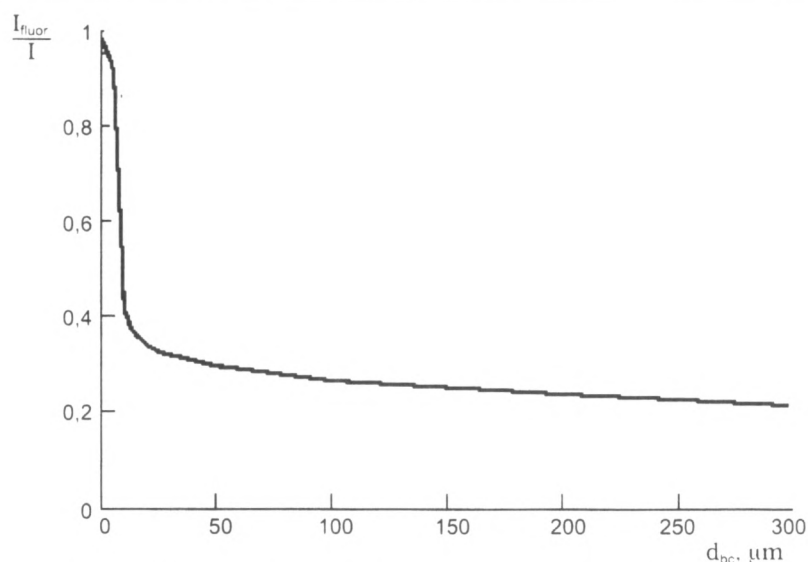
да стабилизируется на уровне 15-30 %. Таким образом, даже в последних моделях рентгеновских трубок с толщиной Ве-окна 50 мкм глав-

ная роль в возбуждении рентгеновского излучения углерода остается за фото- и Оже-электронами, возникающими в облучаемом материале.

Таблица 3

Влияние толщины окна и полярности подключения рентгеновской трубки на компоненты суммарной интенсивности рентгеновской флуоресценции углерода при его малом содержании в кремниевой и железной матрицах

Состав	Процесс возбуждения	Интенсивность (усл. ед.)		$\frac{I_{d=75 \text{ мкм}}}{I_{d=300 \text{ мкм}}}$	Вклад (%)	
		$I_{d=300 \text{ мкм}}$	$I_{d=75 \text{ мкм}}$		$d=300 \text{ мкм}$	$d=75 \text{ мкм}$
0,1 % C + 99,9 % Si	Флуоресценция	3,7	16,6	4,5	21,6	27,6
	Избирательное возбуждение	0,5	1,8	3,7	2,9	2,9
	Действие К электронов	5,6	13,7	2,4	33,1	22,7
	Действие L электронов	1,2	4,3	3,5	7,3	7,2
	Действие Оже-электронов	6,0	23,6	4,0	35,1	39,6
	Фото + Оже-электроны	12,8	41,6	3,3	75,5	69,5
	Суммарная интенсивность	17,0	60,0	3,5	100	100
	Флуоресценция	8,1	36,3	4,5	15,7	25,5
0,1 % C + 99,9 % Fe	Избирательное возбуждение	0,1	0,2	2	0,3	0,2
	Действие К электронов	8,7	14,4	1,7	16,9	10,1
	Действие L электронов	22,2	73,4	3,3	43,1	51,6
	Действие Оже-электронов	12,4	18,0	1,5	24,0	12,6
	Фото + Оже-электроны	43,3	105,8	2,4	84,0	74,3
	Суммарная интенсивность	51,5	142,3	2,7	100	100



Влияние толщины бериллиевого окна рентгеновской трубки на величину вклада фотоэлектрического возбуждения атомов в формирование интенсивности рентгеновской флуоресценции углерода

В табл. 4 сопоставлены интенсивности рентгеновского излучения малых содержаний углерода для рентгеновских трубок с различными материалами анодов и различной толщиной Ве-окна. Напряжение на трубках 40 кВ.

Из табл. 4 следует, что, несмотря на преимущественный рост флуоресценции при уменьшении окна рентгеновской трубки, вклад фото- и Оже-

электронов в возбуждение рентгеновского излучения углерода для рассмотренных анодов при окне 75 мкм (заземленный катод) остается определяющим и составляет величину, варьирующую от 70 до 87 %. Максимальным оказывается вклад этих электронов для железной матрицы при W-аноме, L-излучение которого эффективно возбуждает атомы Fe.

Таблица 4

Составляющие интенсивности (условные единицы) рентгеновской флуоресценции углерода при его содержании 0,1 % в кремниевой и железной матрицах для первичного излучения рентгеновских трубок с Cr, Rh и W анодами. Приведены интенсивности I_{300} при толщине окна 300 мкм (заземленный анод) и I_{75} при толщине окна 75 мкм (заземленный катод)

Анод трубки	Процесс возбуждения	Матрица 0,1 % C+99,9 % Si			Матрица 0,1 % C+99,9 % Fe		
		I_{300}	I_{75}	I_{75} / I_{300}	I_{300}	I_{75}	I_{75} / I_{300}
Cr	Флуоресценция	11	38	3,5	24	82	3,4
	Фото + Оже электроны	68	128	1,9	225	363	1,6
Rh	Флуоресценция	37	166	4,5	81	369	4,5
	Фото + Оже-электроны	128	417	3,3	433	1058	2,4
W*)	Флуоресценция	17	98	5,7	38	210	5,5
	Фото + Оже-электроны	135	306	2,3	867	1563	1,8

*) при расчетах не учтено возбуждение флуоресценции углерода М излучением W-анода.

Если вмещающая матрица состоит из элементов с высокими атомными номерами, то роль К-фото- и К-Оже-электронов наполнителей с высоким атомным номером становится пренебрежимо мала из-за слабой ионизации К-уровня. L-фотоэлектроны играют еще заметную роль, но наряду с ними сильно возрастает ионизация М-оболочки и соответственно появляется большое число М-фотоэлектронов, которые обладают высокой энергией. Кроме того, L-Оже-электроны

элементов с высоким атомным номером приобретают энергию, намного превышающую энергию связи электронов в атомах с малыми атомными номерами.

В табл.5 сопоставлены компоненты суммарной интенсивности излучения углерода в лантановой и свинцовой матрицах (содержание углерода 0,1 %) для рентгеновских трубок с толщиной Ве-окна 300 мкм и трубок с толщиной Ве-окна 75 мкм (Rh-анод, напряжение 40 кВ).

Таблица 5

Влияние толщины окна и полярности подключения рентгеновской трубки на компоненты суммарной интенсивности рентгеновского излучения углерода при его малом содержании в матрицах с атомным номером 57 (La) и 82 (Pb)

Состав	Процесс возбуждения	Интенсивность (усл. ед.)		$I_{d=75 \text{ мкм}}$ $I_{d=300 \text{ мкм}}$	Вклад (%)	
		$I_{d=300 \text{ мкм}}$	$I_{d=75 \text{ мкм}}$		d=300 мкм	d=75 мкм
0,1 % C + 99,9 % La	Флуоресценция	26	113	4,3	6,5	12,4
	Избирательное возбуждение	2	7	3,5	0,6	0,8
	Действие К-электронов	0,02	0,08	4,0	0,006	0,009
	Действие L-электронов	106	143	1,3	26,8	15,5
	Действие М-электронов	180	529	2,9	45,4	57,9
	Действие К-Оже-электронов	0	0	0	0	0
	Действие L-Оже-электронов	82	122	1,5	20,7	13,4
	Фото + Оже-электроны	368	794	2,2	92,9	86,9
0,1 % C + 99,9 % Pb	Суммарная интенсивность	396	914	2,3	100	100
	Флуоресценция	20	93	4,7	10	27
	Избирательное возбуждение	2	5	2,5	0,8	1
	Действие К-электронов	0,02	0,06	3	0,01	0,02
	Действие L-электронов	37	39	1,05	18	11
	Действие М-электронов	120	174	1,5	58	50
	Действие К-Оже-электронов	0	0	0	0	0
	Действие L-Оже-электронов	28	34	1,2	14	10
	Фото + Оже-электроны	186	246	1,3	90	71
	Суммарная интенсивность	208	344	1,7	100	100

Из табл.5 следует, что переход к тонкооконым рентгеновским трубкам больше всего увеличивает рентгеновскую флуоресценцию углерода (рост в 4,3 раза для матрицы с атомным номером 57 и в 4,7 раза для матрицы с атомным номером 82). Интенсивность, возбужденная фото- и Оже-электронами, возрастает в 2,2 раза в случае матрицы с атомным номером 57 и в 1,3 раза в случае матрицы с атомным номером 82. Соответственно растет вклад флуоресценции в суммарную интенсивность излучения углерода. Однако из-за одновременного роста интенсивности, возбужденной фото- и Оже-электронами, вклад последних при тонком окне по-прежнему остается определяющим. Необходимо отметить, что в случае матрицы, содержащей Pb, не учтено возбуждение атомов углерода N-фотоэлектронами свинца, имеющими достаточную для этого энергию.

Эксперимент

Экспериментальная проверка правильности результатов расчета осуществлена путем их сопоставления с интенсивностями рентгеновского излучения углерода, измеренными на рентгеновском спектрометре ARL-9800 с рентгеновской трубкой, катод которой заземлен. Анод трубки родиевый. Толщина Ве-окна 75 мкм. Режим ра-

боты спектрометра: напряжение на трубке 40 кВ, ток 60 мА. В качестве образцов использован набор углеродсодержащих соединений, состав которых подбирался таким образом, чтобы обеспечить возможно большие вариации вклада фото- и Оже-электронов в возбуждение атомов углерода. В число исследуемых материалов входил графит, для которого вклад названных электронов в возбуждение излучения углерода минимален. Выбор в качестве исследуемых материалов соединений углерода вместо его смесей с некоторой средой обусловлен необходимостью сведения к минимуму влияния микроабсорбционной неоднородности материала на измеряемую интенсивность аналитической линии углерода. Для каждого соединения спрессовано по три образца и выполнено по три параллельных измерения.

В табл. 6 сопоставлены экспериментальные и расчетные относительные интенсивности рентгеновского излучения углерода в одиннадцати различных его соединениях. Интенсивности отнесены к интенсивности аналитической линии углерода в графите. Приведены также расчетные значения рассматриваемых относительных интенсивностей без учета ионизации атомов углерода фото- и Оже-электронами.

Таблица 6

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений отношения интенсивности углерода в различных соединениях к его интенсивности в графите

Соединение	Эксперимент	Расчет	
		с учетом фото- и Оже-электронов	без учета фото- и Оже-электронов
CaCO_3	$0,088 \pm 0,006$	0,085	0,054
$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	$0,140 \pm 0,006$	0,139	0,084
$\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	$0,121 \pm 0,006$	0,118	0,070
K_2CO_3	$0,074 \pm 0,006$	0,077	0,044
NaHCO_3	$0,071 \pm 0,004$	0,069	0,041
Na_2CO_3	$0,049 \pm 0,004$	0,044	0,029
Li_2CO_3	$0,088 \pm 0,004$	0,092	0,080
MgCO_3	$0,050 \pm 0,004$	0,051	0,035
$(\text{CH}_3\text{COO})_3\text{La}$	$0,261 \pm 0,004$	0,263	0,117
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$	$0,263 \pm 0,004$	0,120	0,052

Из табл.6 видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчетов, учитывающих влияние фото- и Оже-электронов, и сильно расходятся с интенсивностями, вычисленными без учета этого влияния. В случае пробы, содержащей свинец, экспериментальные данные выше в 2,2 раза, чем расчетные (воз-

можно, из-за неучета возбуждения атомов углерода N-фотоэлектронами свинца). Полученное согласие позволяет считать также достоверными другие результаты, найденные путем расчета.

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что многократное увеличение интен-

сивности первичного излучения при использовании тонкооконных рентгеновских трубок с заземленным катодом не приводит к существенному снижению вклада фото- и Оже-электронов в формирование интенсивности рентгеновского излучения углерода, так что рассматриваемый вклад остается значительным, а в ряде случаев - определяющим.

Достигнутое согласие расчетных и экспери-

ментальных величин создает предпосылки для распространения алгоритмов рентгенофлуоресцентного анализа, предполагающих выполнение теоретических расчетов интенсивностей аналитического сигнала (методы фундаментальных параметров, фундаментальных коэффициентов, теоретических поправок и др.), на определение содержаний элементов с малыми атомными номерами в однородных матрицах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Criss J. Calculation method for fluorescent X-ray spectrometry / J.Criss, I.Birks. // Anal. Chem. 1968. V.40, №7. P.1080-1091.
2. Shiraiwa T. Theoretical correction procedures for X-ray fluorescence analysis / T.Shiraiwa, N.Fujino // X-Ray Spectrometry. 1974. V.3, №2. P.64-73.
3. Tertian R. Unification of fundamental matrix correction methods in X-ray fluorescence analysis // Ibid. 1988. V.17, №3. P.89-98.
4. Rousseau R.M. A comprehensive alpha coefficient algorithm (a second version) // Ibid. 1987. V.16, №3. P.103-108.
5. Pavlinsky G.V. Calculation of photo- and Auger electron contribution to X-ray excitation of elements with low atomic number / G.V.Pavlinsky, A.Ju.Dukhanin // Ibid. 1994. V.23. P.221-228.
6. Pavlinsky G.V. Choise of optimum condition for X-ray excitation of elements with low atomic number / G.V.Pavlinsky, A.Ju.Dukhanin // Ibid. 1995. V.24. P.293-297.
7. Павлинский Г.В. Теоретические основы вычислительного эксперимента в рентгенофлуоресцентном анализе // Аппаратура и методы рентгеновского анализа, Санкт-Петербург, 1992. Вып.41. С.83-104.
8. Finkelstein A.L. Calculation of X-ray tube spectral distributions/ A.L.Finkelstein, T.O.Pavlova // X-Ray Spectrometry. 1999. V. 28, №1. P.27-32
9. Pavlinsky G.V. Calculating the spectral distribution of radiation from X-ray tube with grounded cathode/ G.V.Pavlinsky, A.Ju.Portnoi // Rad. Phys. and Chem. 2001. V.62, №2-3. P.207-213.
10. Pavlinsky G.V. Formation features of radiation from X-ray tube with grounded cathode / G.V.Pavlinsky, A.Ju.Portnoi // X-Ray Spectrometry. 2002. V.31, №3. P.247-251.
11. Claude Merlet Accurate description of surface ionization in electron probe microanalysis: an improved formulation // Ibid. 1992. V.21, №5. P.229-238.

* * * * *

PHOTO- AND AUGER ELECTRONS CONTRIBUTION IN CARBON INTENSITY FORMATION AT EXCITING BY PRIMARY RADIATION OF THIN-WINDOW X-RAY TUBES

A.Yu.Duhanin, G.V.Pavlinsky, A.Yu.Portnoi, A.V.Khun

It is carried out carbon X-ray radiation intensity and its contributions comparison for cases of X-ray tubes with 300 mm window thick (grounded anode) and 75 μ m window thick (grounded cathode). It is shown that the total carbon intensity essentially increase, but the photo and Auger electrons contribution to excitation has remained essential and still is to be taken into account in computing exciting modeling process of long-wave radiation. Experimental results obtained using ARL-9800 has prove correctness of the accounts of the carbon intensity calculation included the photo and Auger electrons atoms ionization account.